

НИИАР П-231

Научно-исследовательский институт
атомных реакторов им.В.И.Ленина

Е.Ф.Давыдов, В.Н.Сюзев, В.В.Колесов

**ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ
КЕРАМИЧЕСКИХ И ДИСПЕРСИОННЫХ
ТВЭЛОВ С ОБОЛОЧКАМИ
ИЗ АУСТЕНИТНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ
СТАЛЕЙ**

Димитровград • 1974

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



Е.Ф.Давыдов, В.Н.Сюзев, В.Э.Колесов

УДК 621.039.548

ИИНАР П-231

Основные виды разрушения керамических и дисперсионных ТВЭЛОВ
с оболочками из аустенитных нержавеющей сталей

Сделана попытка классифицировать разрушения оболочек тепловыделяющих элементов. Приведены перечень и описание характеристик видов наблюдающихся разрушений ТВЭЛОВ различных типов реакторов.

Приведенное описание разрушения может помочь в оценке последствий повреждения и конструировании новых ТВЭЛОВ.

Препринт Научно-исследовательского института атомных реакторов
им. В.И.Ленина, Димитровград, 1974.

E.F.Davydov, V.N.Syuzev, V.V.Kolesov

UDC 621.039.548

SRIAR P-231

The Main Failure Types in Ceramic and Dispersion Fuel
Elements with Austenitic Stainless Steel Cladding

The classification of the fuel element cladding failure has been attempted. A list has been presented and a description has been given of characteristic types of fuel element failures observed in various-type reactors.

The failure description presented can be used in estimating damage consequences and in designing new fuel elements.

Preprint. Scientific Research Institute of Atomic Reactors
Named after V.I.Lenin, Dimitrovgrad, 1974.

Научно-исследовательский институт
атомных реакторов
им. В.И.Ленина

НИИАР П-231

Е.Ф.Давыдов, В.Н.Сюзев, В.В.Колесов

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ И ДИСПЕРСИОННЫХ
ТВЭЛОВ С ОБОЛОЧКАМИ ИЗ АУСТЕНИТНЫХ
НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Д и м и т р о в г р а д
1 9 7 4

Р е ф е р а т

Сделана попытка классифицировать разрушения оболочек тепловыделяющих элементов. Выход из строя твэлов может быть либо закономерным, либо обусловлен случайными причинами. Вид разрушения зависит от типа реактора, параметров эксплуатации, характера предшествующего напряженного состояния.

При изучении состояния большого количества твэлов после облучения наблюдались следующие характерные случаи разрушения:

- разрушение вследствие развития напряжений, превышающих предел прочности, зависящий от времени;
- разрушение вследствие напряжений, превышающих значения предельных кратковременных механических характеристик;
- разрушение из-за концентрации осевых или тангенциальных напряжений в неравномерном поле температур;
- разрушение в результате взаимодействия материалов сердечника и оболочки;
- разрушение вследствие радиального массопереноса компонент топливной композиции;
- потеря устойчивости оболочки.

Приведенное описание разрушений может помочь в оценке последствий повреждения твэлов.



Введение

При эксплуатации или испытании опытных твэлов ядерных реакторов достаточно часто имеют место случаи разгерметизации тепловыделяющих элементов. Поскольку их систематизация может быть полезной, в данной работе сделана попытка классифицировать наблюдавшиеся случаи разрушения (разгерметизации) для широко распространенных керамических и дисперсионных твэлов с оболочками из аустенитных нержавеющей сталей. В основу классификации положен характер (вид) разгерметизации и состояние материала оболочки.

Следует предварительно также отметить, что потеря герметичности твэлов может быть либо закономерной, либо объясняться случайными причинами. Поэтому подход к оценке стойкости твэлов не по характеру, а только по факту разрушения должен быть достаточно осторожным. Приводимые здесь сведения получены при изучении состояния после облучения большого количества твэлов различного назначения. При этом наблюдалось несколько характерных способов потери герметичности оболочек:

- разрушение вследствие развития напряжений, превышающих предел прочности, зависящий от времени;
- разрушение в области умеренных температур (ниже 450°C) при развитии напряжений и появлении деформаций, превышающих значения предельных кратковременных механических характеристик;

. разрушение из-за концентрации осевых или тангенциальных напряжений в неравномерном температурном поле при подходящих соотношениях геометрических размеров оболочки и таблеток топлива.

Описание особенностей этих повреждений может быть полезным при конструировании новых типов твэлов, а также при эксплуатации действующих реакторов для прогнозирования радиационной обстановки, разумного ограничения длительности эксплуатации и контроля параметров, определяющих надежность работы твэлов. Кроме этих названных способов, вызываемых обычными причинами, встречаются отдельные случаи разрушений из-за причин более специфического характера. К ним относятся:

. разрушение вследствие радиального массопереноса компонент топливной композиции с объемными изменениями или искажением температурного поля по сечению твэлов;

. разрушение в результате взаимодействия материалов топлива и оболочки;

. потеря устойчивости оболочки.

Приведенным перечнем в основном исчерпываются наблюдавшиеся виды разрушений, поэтому он и взят за основу классификации. Прежде чем перейти к описанию особенностей каждого из семи вариантов, следует лишь заметить, что в их число не включены случаи явных и больших перегревов твэлов в процессе эксплуатации (сопровождающиеся расплавлением, пережогами, прогарам и т.д.) и разрушения с наружной стороны оболочки, имеющие чисто коррозионный характер.

I. Разрушение вследствие развития напряжений, превышающих предел прочности, зависящий от времени

Этот случай наиболее полно реализуется в твэлах реакторов на быстрых нейтронах. Напряжения в оболочке создаются за счет непрерывно возрастающего давления газовых осколков, набухания топлива и градиентов температур. Разрушение наступает при достижении и превышении предела прочности, за-

висящего от времени. Общая деформация оболочки, как правило, весьма мала, что характерно для испытаний при длительных временах в условиях сложно-напряженного состояния материала. Характер разрушения - основная продольная трещина в наиболее нагруженной зоне, сопровождающаяся сеткой мелких ломаных трещин. Разрушение происходит по границам зерен, начало трещины - у внутренней поверхности оболочки [1]. На рис. 1 приведен внешний вид оболочки в зоне развития трещины у твэла реактора БР-5, проработавшего в течение 5,5 лет в среде натрия до выгорания 6%. Материал оболочки - сталь ОХ18Н9Т, рабочая температура 550°C.

Способы борьбы с такими явлениями - уменьшение эффективной плотности топлива, выбор достаточного исходного зазора между топливом и оболочкой, введение компенсатора давления газа, использование сталей с более высокой длительной прочностью.

2. Разрушение в области умеренных температур при развитии напряжений, превышающих предельные кратковременные прочностные характеристики

Такое разрушение наблюдается при нормальной эксплуатации ниже температуры, с которой начинается изменение механических свойств (для аустенитных сталей - ниже 450°C). Разрыв оболочки характерен для пластичного разрушения, в месте разрыва обычно наблюдается явное увеличение диаметра, иногда - незначительный изгиб [2].

На рис. 2 показан общий вид опытного образца твэла ϕ 6x0,3 и образование шейки в месте разрыва.

Оболочка твэла - сталь ОХ16Н15МЗБ, топливо - виброуплотненная двуокись урана. Облучение проводилось в воде, температура оболочки не превышала 150°C.

Пластичное разрушение связано с некоторой необратимой предшествующей деформацией, для создания которой необходимо затратить соответствующую работу. Последняя связана с

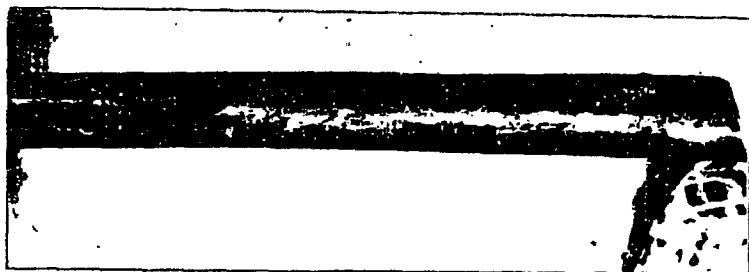


Рис. 1. Разрушение высокотемпературного твэла

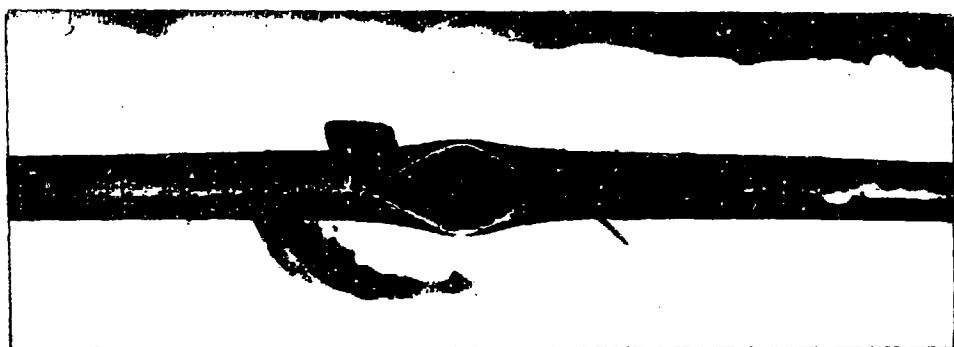


Рис. 2. Пластичное разрушение

запасенной упругой энергией системы, определяемой геометрией твэла и применяемыми материалами. В системах с большой запасенной энергией пластическая деформация сосредотачивается на отдельных, наиболее нагруженных участках. Таким образом, в рассматриваемом случае величина деформации и степень развития разрушения могут быть совершенно различными и определяются величиной запасенной энергии.

В целом, разрушение под облучением при умеренных температурах необходимо рассматривать как испытание материала на разрыв при двухосном напряженном состоянии, дополнительно учитывая лишь влияние облучения на значение кратковременных механических свойств. Предупреждение разрушений такого вида можно видеть в соблюдении заданных режимов эксплуатации и улучшении конструкции.

3. Разрушения из-за концентрации осевых или тангенциальных напряжений

Кроме обычного вида разрушения оболочки в виде продольной трещины, наблюдались разрушения ее в виде поперечных трещин без изменения структуры материала оболочки. Этот вид разрушения может наблюдаться у твэлов, в сердечниках которых не происходит переформирование структуры. В работе [3] дается обоснование такому способу разгерметизации, который происходит из-за возникновения в определенных местах локальных осевых напряжений. При наличии большого градиента температуры по радиусу топливной таблетки центр ее удлиняется в большей степени, чем края и оболочка. Если зазор между таблетками и оболочкой при данной температуре выбирается и проскальзывания столба топлива относительно оболочки нет, то расширение центра таблеток приводит к локальному растяжению участка оболочки между торцами таблеток. Такие пики осевых напряжений приводят к деформации твэлов в осевом направлении (и общему удлинению твэлов) или к разрушению оболочки на стыках таблеток при превышении предела прочности ее материала.

На рис. 3 показан снимок экспериментального твэла с поперечными разрушениями оболочки на стыках таблеток или групп нескольких таблеток. Таблетки топлива (карбид урана) имели плотность более 95% теоретической, зазор между таблетками и оболочкой был менее 0,1 мм, зазор между таблетками отсутствовал. В аналогичном твэле, отличавшемся меньшей плотностью таблеток топлива (~85% теоретической), подобных разрушений не было.

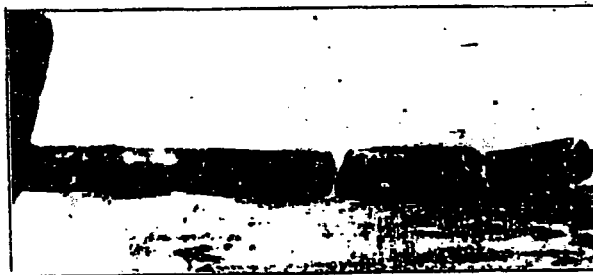


Рис. 3. Поперечное разрушение по стыкам таблеток

Аналогичным образом может быть вызвана концентрация тангенциальных напряжений при недостаточном исходном зазоре между таблеткой топлива и оболочкой. В этом случае происходит образование короткой продольной трещины в оболочке, расположение которой после облучения соответствует расположению трещины в таблетке (рис. 4). Предотвращение разрушений такого характера можно осуществить уменьшением плотности топлива, правильным выбором величин зазора между сердечником и оболочкой и отбраковкой твэла с меньшими, чем расчетные, зазорами.

4. Разрушение вследствие радиального массопереноса компонент в топливной композиции

В дисперсионных твэлах, облучавшихся в каналах реактора СМ-2, наблюдались случаи значительных изменений макроструктуры топливной композиции [4]. Они сводились к перераспределению компонент топливной композиции таким образом, что образовывались отдельные зоны топливной или матричной составляющей, а у границы с оболочкой структура сохранялась близкой к исходной. Такой массоперенос иллюстрируется на рис. 5. Иногда изменения структуры были еще большими и в центре твэлов наблюдалось образование центральной цилиндрической полости.

Вследствие изменения макроструктуры происходило искажение температурного поля из-за смещения зон энерговыделения и изменения теплопроводности слоев. Поскольку наиболее вероятной причиной такого явления является кратковременный перегрев и последующая кристаллизация типа зонной плавки, могло происходить также увеличение объема. В конечном итоге наблюдалось разрушение оболочки, аналогичное показанному на рис. 5. Соблюдение расчетных режимов эксплуатации, очевидно, позволит избежать разрушения твэлов по этой причине.

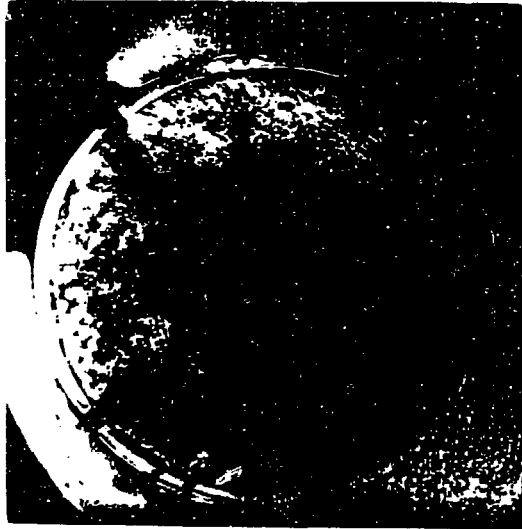


Рис. 4. Макроструктура поперечного сечения твалов с трещинами в сердечнике и оболочке, х5



Рис. 5. Разрушение из-за массопереноса, х5

5. Разрушение в результате взаимодействия материалов топлива и оболочки

При создании твэлов обычно выбираются совместимые при рабочих параметрах материалы топлива и оболочки. Однако иногда верхняя граница области совместимости по температуре находится слишком близко к рабочей и при перегреве, вызванном любыми причинами, начинается взаимодействие материалов топлива и оболочки. В зависимости от применяемых материалов и условий работы может либо образовываться сплошной слой новой фазы на границе, либо взаимодействие идет с образованием выделений новой фазы в теле оболочки. В первом случае уменьшается рабочая толщина оболочки и ее несущая способность, во втором - значительно изменяется структура и механические свойства материала оболочки. При достаточной длительности облучения может произойти разрушение оболочки (рис.6).

6. Потеря устойчивости оболочки

Исходя из специфических требований водо-водяных реакторов, в них применяются большие давления теплоносителя. При этом для тонкостенных оболочек твэлов не исключена возможность повреждения при потере устойчивости оболочки под воздействием высокого наружного давления. К вопросу устойчивости оболочек в последнее время проявляется определенный интерес [5]. На одном из опытных образцов (рис.7) наблюдалось смятие оболочки, которое было классифицировано как потеря устойчивости. Оболочка твэла из стали ОХ16Н15МЗБ диаметром $10 \times 0,3$ мм с виброуплотненным порошкообразным горючим, температура оболочки не превышала 200°C . Оболочка была смята, очевидно, в начальный момент работы, когда температура поверхности и центра сердечника была максимальной, т.е. еще не произошло полного формирования структуры сердечника и он не оказал достаточного сопротивления внешней нагрузке теплоносителя. Потери герметичности при этом не произошло, но повреждения такого вида могут вызывать

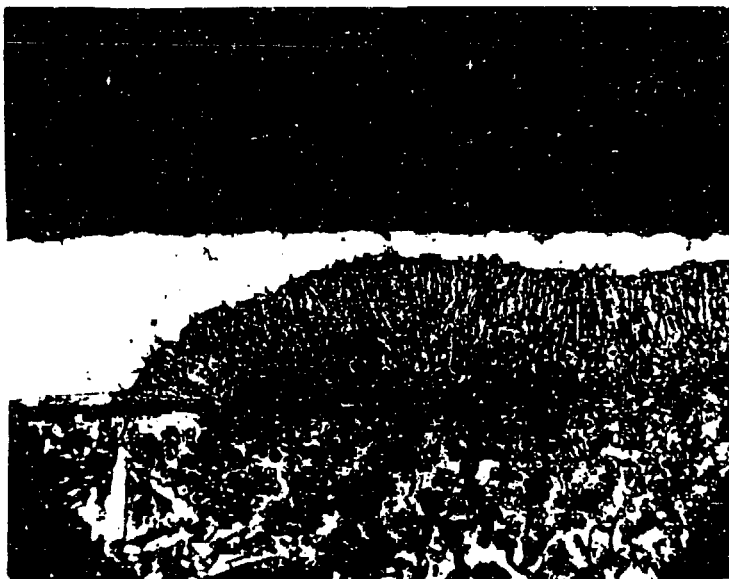


Рис. 6 . Взаимодействие оболочки с сердечником
(не травлен), х200

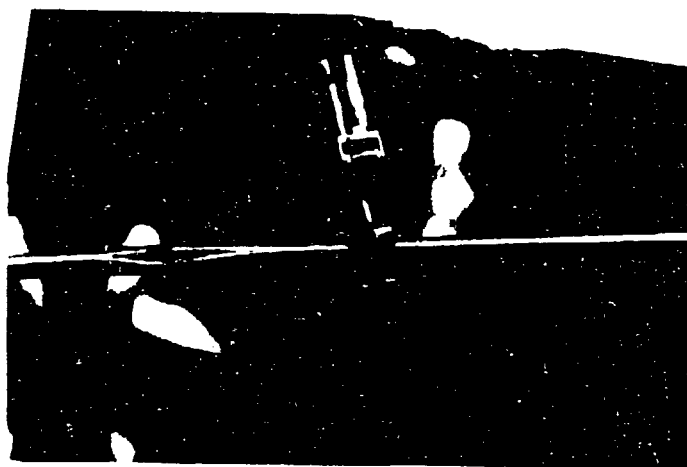


Рис. 7 . Смятие оболочки твэлов при потере устойчивости

перекрытие каналов для прохода теплоносителя в сборке твэлов.

Рассмотренные случаи повреждения оболочек твэлов, безусловно, не охватывают всего многообразия возможных вариантов разрушения, хотя и являются наиболее типичными. Поэтому есть все основания надеяться, что знание причин возникновения подобных явлений и разработка эффективных способов их предупреждения могут быть весьма полезны для повышения надежности работы активных зон ядерных реакторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казачковский О.Д. и др. Атомная энергия, 28, 2 (1968).
2. Балашов В.Д. и др. Препринт НИИАР, П-47, Мелекесс(1969).
3. Кьорхеим Г., Ролстад Б. Атомная техника за рубежом, 7 (1970).
4. Давыдов Е.Ф., Тучнин Л.М. Атомная энергия, 32, 4 (1972).
5. Лихачев Ю.И., Попов В.В. Атомная энергия, 32, I (1972).

Рукопись поступила в редакционно-издательскую группу ОНТИ 16 мая 1972 г.
В окончательной редакции 8 января 1974 г.

Отпечатано в Научно-исследовательском институте атомных реакторов им. В.И.Ленина

Т-09386 от 19.XII.73 г. Тираж 150 экз. 0,5 уч.-изд. листа.
Редактор Д.А.Галимова. Цена 5 коп. Январь, 1974.